مطالعه آزمایشگاهی پارامترهای تعیین‌کننده‌ی ظرفیت باربری کششی شمع فولادی در ماسه *

عیسی شوش پاشا[1] مهدی شرف‌خواه[2]

چکیده *در این مطالعه با استفاده از آزمایش بارگذاری کششی انجام شده بر روی شمع‌های با مقیاس واقعی، ظرفیت باربری کششی شمع‌های فلزی ارزیابی می‌شود. در این راستا پس از بررسی روش‌های موجود برای پیش‌بینی ظرفیت باربری کششی شمع‌ها و بیان خصوصیات خاک، تجهیزات و روش انجام کار، اقدام به ارائه‌ی نتایج حاصل از آزمایش بر روی هفت عدد شمع با قطر ثابت ۱/۲۰ متر و طول‌های ۴/۲۰ الی ۴/۸۰ متر گردید. آن‌گاه ضریب فشار جانبی خاک و زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این نمایش نشان می‌دهد نسبت زاویه‌ی اصطکاک بین جدار شمع فولادی و خاک به زاویه‌ی اصطکاک خاک برابر ۰/۵۲ است و نیز ضریب فشار جانبی خاک در جداره‌ی شمع به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی شمع، ماسه، اصطکاک جداره، ظرفیت باربری، ضریب فشار جانبی خاک، زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع.

Experimental Study on Parameters Affecting on Pile Tension Capacity in Sand

I. Shooshpasha M. Sharafkhah

Abstract *In this study, the shaft capacity of open- end steel pile in sandy soil was evaluated using a number of full scale tensile pile load test. Mentioning the available methods of predicting the shaft resistance of the pile, the soil properties and test apparatus, the results obtained from pile loading tests was presented. In the present study, 7 piles with constant diameter of 1.20m with different length of 4.20m up to 4.80m have been loaded. The earth pressure coefficient and frictional angle at the soil-pile interface were evaluated. The results of the study showed that for this method of pile installation, frictional angle in the soil-pile interface is 0.52 times of frictional angle of soil and the earth pressure coefficient reduces considerably.*

Key Words Piles, Sand, Shaft Resistance, Earth Pressure Coefficient, Interface Frictional Angle.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۳/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۶/۱۰ می‌باشد.

(۱) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: کارشناس ارشد ژئوتکنیک، فارغ‌التحصیل دانشگاه صنعتی بابل.

مقدمه

بیشتر مطالعات در خصوص ظرفیت باربری شمع‌ها، تحت بارگذاری فشاری انجام شده است، در صورتی که در بسیاری از موارد شمع‌ها تحت بارگذاری کششی قرار دارند. بنابراین بررسی رفتار شمع‌ها تحت بارگذاری کششی و اندازه‌گیری ظرفیت‌باربری این شمع‌ها می‌تواند بسیار مهم باشد.

مقاومت برشی نهایی در جداره یک شمع (τ_f) به‌صورت تابعی از تنش جانبی تثبیت شده بعد از احداث شمع (σ'_{rc})، تنش جانبی اضافی در اثر بارگذاری($\Delta\sigma'_{rc}$)، و زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع در تماس با خاک (δ_f)، طبق رابطه‌ی زیر ارائه شده است[1]:

$$\tau_f = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rc})\tan\delta_f = \sigma'_{rf}\tan\delta_f \qquad (1)$$

در ماسه مقدار $\Delta\sigma'_{rc}$ برای شمع‌های با قطر بزرگ‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر نسبتاً کوچک است ، بنابراین تنش جانبی مؤثر در پیک مقاومت برشی σ'_{rf} را می‌توان با σ'_{rc} برابر در نظر گرفت[2]. هم‌چنین بعد از احداث شمع و قبل از بارگذاری استاتیکی، تنش جانبی مؤثر با تنش تثبیت شده‌ی جانبی (σ'_{rc}) برابر خواهد بود.

زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع را در هنگام گسیختگی δ_f می‌توان توسط آزمایش های مناسب اندازه‌گیری نمود [3]. برای شمع‌های متعارف (بتن و فولاد نرمه‌ی اکسید شده) زاویه‌ی اصطکاک جداره بین ۰/۷۵ تا ۱ برابر زاویه‌ی اصطکاک خاک خواهد بود. برای مواقعی که اطلاعات کافی برای جداره‌ی شمع در اختیار نیست، می‌توان مقدار آن را برابر با زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی خاک (φ_{cv}) در نظر گرفت. این فرض با توجه به این‌که هیچ‌گونه اتساعی بین جداره‌ی شمع و خاک اتفاق نیفتد بنا نهاده شد. برای محاسبه‌ی مقاومت اصطکاکی جداره‌ی شمع در ماسه رابطه‌ی زیر پیشنهاد شده است[4]:

$$\tau_S = \sigma'_r \cdot \tan\delta = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan\delta \qquad (2)$$

که K ضریب فشار جانبی خاک می‌باشد و به ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون (K_0)، روش احداث شمع و میزان دانسیته‌ی اولیه‌ی ماسه بستگی دارد. برای شمع‌های درجای متعارف مقدار K به‌طور معمول برابر با ۰/۷ و شمع‌های درجا به روش حفاری پیوسته با اوگر این مقدار برابر با ۰/۹ (در ماسه) و ۰/٦(در سیلت و ماسه سیلتی) انتخاب می‌شود. برای شمع‌های پیش‌ساخته‌ی کوبیدنی و نیز شمع‌هایی که ابتدا غلاف کوبیده و سپس درون آن بتن‌ریزی می‌شود این ضریب برابر ۱/۲ یا بیش‌تر در خارج از غلاف لحاظ می‌گردد و پس از خارج کردن غلاف مقداری کاهش دارد [4]. در این مقادیر هیچ‌گونه تمایزی بین شمع‌های کششی و فشاری وجود ندارد.

بر اساس ٤١ عدد آزمایش انجام شده روی شمع‌ها، روابط زیر توسط O'Neill و همکاران در سال ۱۹۹٤ پیشنهاد شد[5].

$$\tau_S = \beta \cdot \sigma'_Z \qquad (3)$$

$$\beta = 1.5 - 0.245 Z^{0.5} \qquad (4)$$

و توصیه شده است که برای اعداد نفوذ کم‌تر از ۱۵، مقدار β در ضریب کاهش N/15 ضرب شود[6]. در این روابط Z عمق نقاط روی جداره‌ی شمع نسبت به سطح زمین ، σ'_Z تنش مؤثر قائم در عمق Z و N عدد نفوذ استاندارد می‌باشد. رابطه‌ی فوق در شرایطی صادق است که $0.25<\beta<1.20$ و $\tau_S<200\,\text{kpa}$ باشد. در این روابط تفاوتی برای مقادیر β در کشش و فشار ذکر نشده است. از آن‌جائی‌که مقاومت جداره‌ی شمع‌ها تحت بارگذاری کششی با مقاومت جداره‌ی شمع‌ها تحت بارگذاری فشاری متفاوت می‌باشد لذا رابطه‌ی زیر پیشنهاد شده است [7]:

$$\frac{(Q_s)_{tens}}{(Q_s)_{comp}} \approx \left(1 - 0.2\log\left(\frac{100}{L/D}\right)\right)(1 - 8\eta + 25\eta^2) \qquad (5)$$

در این رابطه Q_S مقاومت جداره‌ی شمع از جنس نیرو، $\eta = \nu_p (L/D)(G_{avg}/E_p)\tan\delta$ که G_{avg}، E_p و ν_p به‌ترتیب مدول برشی متوسط، مدول یانگ شمع و ضریب پواسون شمع، D قطر شمع، L طول شمع

می‌باشند. مقادیر نمونه برای نسبت مقاومت کششی به فشاری جداره‌ی شمع‌ها طبق رابطه‌ی (۵) بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ می‌باشد. برای β رابطه‌ی زیر نیز پیشنهاد شده است [8]:

$$\beta = F\tan(\varphi' - 5°) \quad (۶)$$

در این رابطه F مقدار ثابتی است که به‌ترتیب برای شمع‌های کششی و فشاری برابر ۰/۵ و ۰/۷ می باشد.

بر اساس ۳٤ عدد آزمایش کششی شمع، Alawneh در سال ۱۹۹۹ روشی را برای تخمین مقاومت جداری شمع‌ها پیشنهاد نمود [9]. بر اساس روش فوق، مقاومت نهایی جداره شمع به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\tau_{m(z)} = \sigma'_{rf(z)} \tan\delta_f \quad (۷)$$

$$\sigma'_{rf(z)} = K_{(z)} \sigma'_{v(z)} \quad (۸)$$

$$K_{(z)} = K_{min} + (K_{max} - K_{min}) \exp\left[-0.03\left(\frac{L-Z}{D}\right)\right] \quad (۹)$$

$$K_{max} = 0.35\exp(0.03D_r)\left(\frac{D+0.45}{2D}\right)^{0.005D_r}\left(\frac{\sigma'_{vtip}}{P_a}\right)^{-0.84} \quad (۱۰)$$

که $\tau_m(z)$ مقاومت جداری نهایی شمع، $\sigma'_{rf}(z)$ تنش مؤثر جانبی در لحظه‌ی گسیختگی، $\sigma'_v(z)$ تنش مؤثر قائم، σ'_{vtip} تنش مؤثر قائم در نوک شمع، $K_{(z)}$ ضریب فشار جانبی خاک برای شمع کششی، Pa فشار اتمسفر (۱۰۱/۳کیلوپاسکال) D_r دانسیته‌ی نسبی، K_{max} ضریب فشار جانبی حداکثر در نوک شمع که از (۱۰) به‌دست می‌آید و K_{min} ضریب فشار جانبی حداقل می‌باشد. ضریب فشار جانبی حداقل (K_{min}) می‌تواند به ضریب فشار جانبی محرک رانکین (k_a) Rankine مرتبط شود، هر چند Alawneh مقدار K_{min} را برابر با ۰/۲۳ پیشنهاد داده است. مقدار متوسط K_{min} که توسط Alawneh محاسبه شد حدود ۲٤٪ کم‌تر از مقدار k_a متناظر است. به‌دلیل فقدان اطلاعات مشخص در مورد مقادیر K در روش Alawneh [9]، δ در رابطه‌ی (۲) و β در روش O'Neill [5]، در این تحقیق سعی شده است تا مقادیر این پارامترها با انجام آزمایش کششی شمع‌ها در محل مورد بررسی قرار گیرد.

مشخصات خاک محل

منطقه‌ی مورد مطالعه در شهر محمودآباد در استان مازندران در حاشیه‌ی جنوبی دریای خزر است. این منطقه از رسوبات دوره‌ی پالزوئیک و کواترنری شکل گرفته است. براساس مشاهده‌ی لایه‌بندی زمین در زمان شناسایی خاک به‌نظر می‌رسد که این منطقه متعلق به دوره‌ی چهارم زمین شناسی می‌باشد.

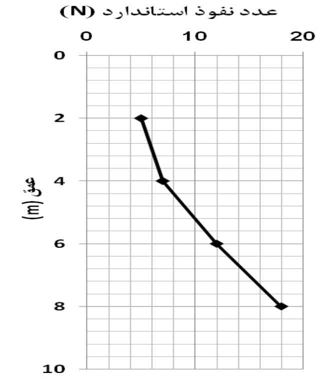
برای شناسایی خاک از دو گمانه به عمق ۲۵ متر در زمینی به مساحت ٤۰۰ مترمربع استفاده شده است. به این ترتیب، هم‌زمان با پیشرفت عملیات حفاری اقدام به تهیه‌ی نمونه، تعیین لایه‌بندی خاک و انجام آزمایش نفوذ استاندارد گردید. تغییرات عدد نفوذ استاندارد بر حسب عمق در شکل (۱) ارائه شده است. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شد و آزمایش‌های مربوط به تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بر روی آن‌ها انجام گرفت. طبق روش طبقه‌بندی جهانی خاک‌ها، خاک مورد نظر در گروه SP جای دارد. دانسیته‌ی نسبی این خاک حدود ۱۵٪ برآورد شده است که مربوط به خاک‌های سست و خیلی سست می‌باشد. تراز آب زیرزمینی در عمق ٤/۵ متر از سطح زمین واقع شده است. روی نمونه‌ها آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM- D 3080 انجام شده است. نتایج شناسایی خاک در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات خاک گمانه BH1

Depth [m]	C [kpa]	φ	e	Gs	Cz	Cu	Soil
1.0	0	27.7	0.75	2.69	0.94	2.43	SP
2.5	--	--	0.51	2.68	0.51	6.55	SP
4.0	--	--	0.41	2.67	0.49	2.93	SP

جدول ۲ مشخصات خاک گمانه BH2

Depth [m]	C [kpa]	φ	e	Gs	Cz	Cu	Soil
1.0	--	--	0.67	2.81	1.05	1.94	SP
2.5	0	25.1	0.68	2.80	1.08	2.01	SP
4.0	--	--	0.49	2.66	0.49	7.73	SP



شکل ۱ نمودار عدد نفوذ استاندارد (N) نسبت به عمق

آزمایش کشش شمع‌ها

برای اندازه‌گیری ظرفیت باربری کششی شمع‌ها ابتدا تجهیزات آزمایش طراحی و ساخته شده است. بدین ترتیب پس از ساخت یک قاب فلزی، با کمک جک و نیروسنج، ظرفیت باربری کششی شمع اندازه‌گیری می‌شود. با کمک یک جرثقیل بار کششی وارد شده به این قاب فلزی توسط کابل به شمع منتقل می‌شود؛ بدین صورت که ابتدا بار اعمال شده به حلقه‌ی بالایی وارد شده، سپس از حلقه بالایی به جک و از جک به حلقه‌ی پایین منتقل می‌شود و در نهایت نیرو از طریق کابل به بالای شمع اعمال خواهد شد. مقدار نیرو توسط نیروسنج قرائت می‌شود. مراحل انجام آزمایش در شکل‌های (۲) تا (٤) نمایش داده شده است.

برای احداث شمع، ابتدا گودالی به قطر ۱۱۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر حفر می‌شود. سپس شمع در مسیر این گودال قرار می‌گیرد. هم‌زمان با حفاری داخل گودال، شمع‌های فولادی به داخل خاک رانده می‌شوند به‌نحوی که همواره نوک لوله‌ی فولادی ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر پایین‌تر از کف گودال قرار گیرد. این نیروی فشاری حاصل سربار آویزان شده بر روی شمع و نیز وزن خود شمع می‌باشد.

از آن‌جایی‌که این لوله‌های فولادی به‌عنوان غلاف برای اجرای شمع‌های بتنی درجا مورد استفاده قرار می‌گیرد لذا قبل از بتن‌ریزی ظرفیت باربری کششی این شمع‌های فولادی اندازه‌گیری می‌گردد. به این ترتیب که با بیرون کشیدن غلاف، نیروی مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک جداره شمع اندازه‌گیری می‌شود.


شکل ۲ نصب نیروسنج بین قاب فلزی


شکل ۳ اعمال نیروی کششی به شمع‌ها


شکل ٤ قرائت نیروی اعمال شده، ارائه‌ی نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها

آزمایش ظرفیت باربری کششی بر روی ۷ شمع فولادی با قطر ثابت ۱۲۰ سانتی‌متر و طول متغیر بین ۴۲۰ سانتی‌متر تا ٤۸۰ سانتی‌متر انجام شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ظرفیت کششی شمع در

جدول (۳) نمایش داده شده است. در این جدول علاوه بر ظرفیت کلی اندازه‌گیری شده در محل، ظرفیت باربری شمع بدون در نظر گرفتن وزن شمع که در انجام محاسبه‌ها حداکثر نیروی کششی خالص نامیده می‌شود نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است که در آزمایش بارگذاری از یک شمع فولادی با وزن و طول ثابت استفاده شده است و اختلاف طول شمع‌ها در مقدار حفاری می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش در شکل (۵) نیز نشان داده شده است. مقادیر متوسط مقاومت جداره‌ی شمع که در محاسبه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد در جدول (٤) نشان داده شده است.

جدول ۳ ظرفیت باربری کششی اندازه‌گیری شده‌ی شمع‌ها

حداکثر نیروی کششی خالص [kN]	حداکثر نیروی کششی[kN]	حداکثر جابه‌جایی شمع[cm]	طول مدفون شمع [m]	Pile No.
78.48	100.55	12.0	480	P1
64.31	86.38	8.0	420	P2
73.58	95.65	10.0	450	P3
68.13	90.20	8.0	420	P4
80.93	103.01	10.0	480	P5
71.12	93.20	10.0	450	P6
76.03	98.10	12.0	465	P7

قطر شمع‌ها= 120 cm   وزن شمع = 22.07 kN

بر اساس رابطه‌ی (۵)، نسبت ظرفیت کششی به فشاری شمع‌ها در این تحقیق برابر با ۰/۷۲ به‌دست خواهد آمد که از این عدد در ادامه برای سایر محاسبه‌ها نیز استفاده می‌شود.

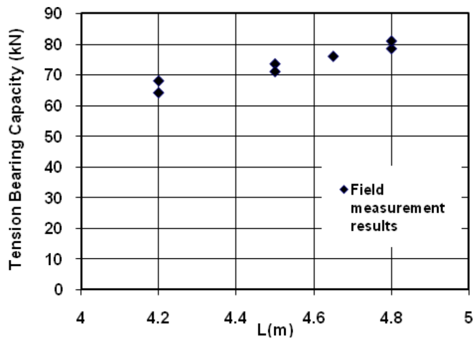
جدول ٤ ظرفیت باربری کششی متوسط اندازه‌گیری‌شده‌ی شمع‌ها

طول شمع [cm]	420	450	465	480
نیروی کششی اندازه گیری شده $Q_{s(tens)}$ [kN]	66.22	72.30	76.03	79.66

از طرفی رابطه‌ی (٤) را می‌توان در حالت کلی به‌صورت معادله‌ی زیر بازنویسی نمود.

$$\beta=\alpha(1.5-0.245Z^{0.5}) \qquad (۱۱)$$

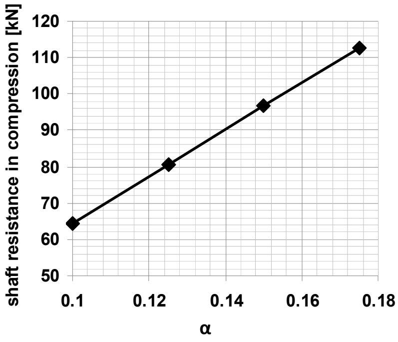
براساس معادله‌ی پیشنهادی O'Neill زمانی که N>15 مقدار α برابر ۱ است و برای N<15 این ضریب برابر با N/15 می‌باشد. به‌عبارت دیگر هنگامی که N کم‌تر از ۱۵ باشد، ضریب α استفاده می‌شود. در این مطالعه مقدار ضریب فوق به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مقاومت جداره‌ی حاصل از رابطه‌ی (۳) با مقدار اندازه‌گیری شده در محل برابر شود. به این ترتیب مقدار α با کمک شکل (٦) تعیین می‌شود که نتایج به‌دست آمده در جدول (۵) نشان داده شده است. برای ساده شدن محاسبه‌ها مطابق پیشنهاد De Nicola و Randolph [7]، فرض می‌گردد که مقاومت جداره برای بار کششی برابر ۰/۷۲ مقاومت جداره در هنگام اعمال بار فشاری شمع باشد. از آن‌جایی‌که در این مطالعه مقاومت جداره برای بار کششی شمع‌ها اندازه‌گیری شده است، از این‌رو مقدار α معادل متناظر با مقاومت جداره‌ی فشاری شمع‌ها به کمک شکل (٦) تعیین شده است که به‌شرح جدول (۵) می‌باشد.



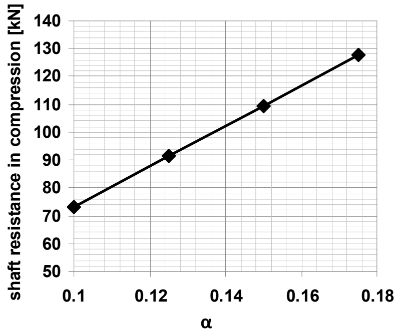
شکل ۵ تغییرات مقاومت جداره‌ی اندازه‌گیری شده در محل با طول شمع

جدول۵ تعیین متوسط α

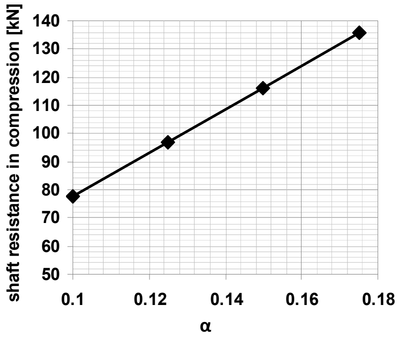
L[m]	4.2	4.5	4.65	4.8	متوسط
α	0.143	0.138	0.136	0.135	0.138
Qs(copm)[kN]	91.97	100.42	105.6	110.64	-
Qs(tens)[kN]	66.22	72.30	76.03	79.66	-



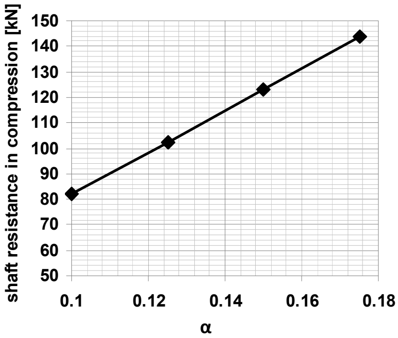
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ٦ تغییرات مقاومت جداره‌ی شمع‌های فشاری با α
الف)شمع ٤/٢ متری، ب) ٤/٥ متری ، پ) ٤/٦٥ متری ، ت) ٤/٨ متری

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار متوسط α (آمده در جدول ٥) برابر با ٠/١٣٨ می‌باشد. براین اساس رابطه‌ی (٨) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\beta=0.138(1.5-0.245Z^{0.5}) \qquad (١٢)$$

با توجه به ضریب N/15 پیشنهادی O'Neill مقدار N برابر است با:

$$N=15\times0.138=2.07$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود این مقدار کم‌تر از مقدار N متناظر با خاک واقعی است. بنابراین براساس α =٠/١٣٨ مقدار این ضریب در مقایسه با ضریب کاهشی N/15 در روش O'Neill کوچک می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که رابطه‌ی O'Neill برای شمع‌هایی که مطابق روش اشاره شده در مطالعه‌ی حاضر احداث می‌شوند، می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی گردد:

$$\beta=\frac{N}{36}(1.5-0.245Z^{0.5}) \qquad (١٣)$$

به‌عبارت دیگر مقدار β برای ماسه سست و خیلی سست حاضر حدود ٠/٤ برابر ضریب پیشنهادی O'Neill است.

با کمک مقدار α در جدول (٥) و رابطه‌ی (١١) مقدار β در طول شمع محاسبه شده و در جدول (٦) ارائه شده است.

مقدار متوسط β نشان داده شده در جدول (٦) برابر ٠/١٤٧ برای شمع‌های تحت بارگذاری فشاری می‌باشد که کم‌تر از مقدار حدی ٠/٢٥ در رابطه‌ی (٤) می‌باشد. با استفاده از ضریب ٠/٧٢ به‌عنوان نسبت مقاومت جداره‌ی کششی به فشاری، متوسط β حدود ٠/١٠٦ برای شمع‌های کششی به‌دست خواهد آمد. این در حالی است که اگر مقدار متوسط β با کمک نتایج به‌دست آمده از آزمایش تخمین زده شود، مقدار آن برابر ٠/١٠٧ به‌دست خواهد آمد تا نتایج تحلیلی با آزمایشگاهی برابر شود.

از طرف دیگر با استفاده از رابطه‌ی (٦) و با انتخاب زاویه‌ی اصطکاک جداره ٢٧/٧ درجه، β برابر ٠/٢٠٩ برای F=٠/٥ (شمع‌های کششی) محاسبه می‌شود. این مقدار حدود ١/٩٥ برابر مقدار β محاسبه شده

با کمک نتایج آزمایش می‌باشد. با قبول β= ۰/۱۰۷ و بهره گرفتن از رابطه‌ی (٦) مقدار F برابر ۰/۲۰ خواهد شد که کم‌تر از ۰/۵ مقدار پیشنهادی [8] می‌باشد.

جدول ٦ تغییرات β در طول شمع های موردآزمایش

L=4.2 m						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.1	average
β	0.189	0.171	0.159	0.149	0.143	0.153
L=4.5 m						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.25	average
β	0.182	0.165	0.153	0.143	0.137	0.147
L=4.65 m						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.325	average
β	0.181	0.164	0.152	0.142	0.135	0.146
L=4.8 m						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.4	average
β	0.179	0.162	0.150	0.141	0.133	0.153
Average β						0.147

مقادیر $K_{(z)}$ و K_{max} در روش Alawneh در سال ۱۹۹۹ در طول شمع مطابق جدول (۷) نشان داده شده‌اند. برای همه‌ی شمع‌ها مقدار K_{min} برابر ۰/۲۳ فرض شده است.

جدول ۷ تغییرات Kz و Kmax در طول شمع‌های مورد آزمایش

L=4.2 m, Kmax=0.458						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.1	average
K(z)	0.438	0.443	0.449	0.454	0.457	0.452
L=4.5 m, Kmax=0.432						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.25	average
K(z)	0.413	0.418	0.422	0.427	0.431	0.426
L=4.65 m, Kmax=0.420						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.325	average
K(z)	0.402	0.406	0.411	0.415	0.419	0.414
L=4.8 m, Kmax=0.409						
z[m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4.4	average
K(z)	0.391	0.395	0.399	0.404	0.408	0.403
Average K(z)						0.422

با استفاده از رابطه‌ی (۷)، مقدار $\tan\delta$ که بتواند مقاومت جداره‌ی متناظر با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل را تولید نماید تعیین گردید که به‌شرح جدول (۸) و شکل (۷) می‌باشد.

جدول ۸ تغییرات $\tan\delta$ در شمع‌های آزمایش

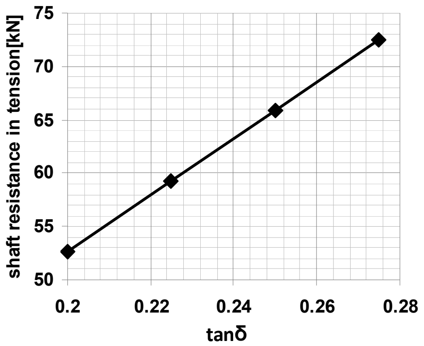
L[m]	4.2	4.5	4.65	4.8	average
tanδ	0.251	0.253	0.257	0.259	0.255
Q_{tens}	66.22	72.30	76.03	79.66	-

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، مقدار متوسط $\tan\delta$ برابر ۰/۲۵۵ است. یعنی مقدار δ برابر ۱۴/۳۱ درجه خواهد بود لذا می‌توان گفت مقدار δ برابر است با ۰/۵۲φ.

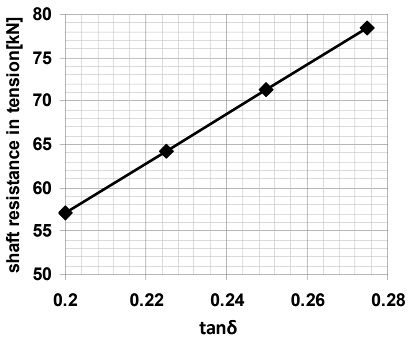
بر اساس ۰/۱۰۷ = β حاصل از آزمایش و ۰/۲۵۵ = $\tan\delta_{(avg)}$ طبق جدول (۸) مقدار K_{avg} به‌کمک روابط (۲) و (۳) در طول شمع به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$0.107=0.255\times K_{avg} \Rightarrow K_{avg}=0.419$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود این مقدار با K_{avg} به‌دست آمده از جدول (۷) تقریباً برابر است.

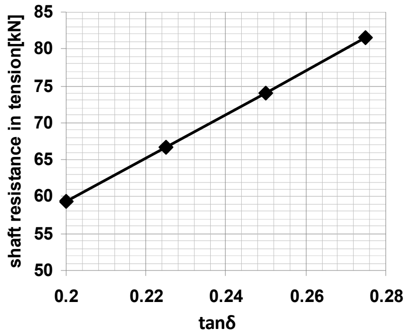


(الف)

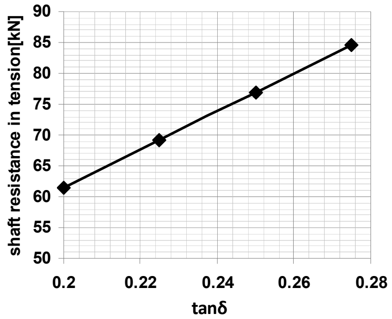


(ب)

شکل ۷ تغییرات مقاومت جداره‌ی شمع‌های کششی با $\tan\delta$
الف)شمع۴/۲ متری، ب) ۴/۵ متری ، پ) ۴/٦۵ متری، ت) ۴/۸ متری



(پ)



(ت)

ادامه‌ی شکل ۷ تغییرات مقاومت جداره‌ی شمع‌های کششی با tanδ
الف)شمع ٤/٢ متری، ب) ٤/٥ متری ، پ) ٤/٦٥ متری،
ت) ٤/٨ متری

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با بهره گرفتن از نتایج هفت مورد آزمایش کشش بر روی شمع در مقیاس واقعی، مقدار ضریب فشار جانبی خاک K، زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع δ و پارامتر β مورد استفاده در روش O'Neill سال ١٩٩٤ ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد که روش احداث شمع به‌کار گرفته شده در این مطالعه، مقاومت جداره‌ی شمع را به‌طورقابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مقدار β در روش پیشنهادی O'Neill حدود ٦٠ درصد کاهش می یابد و نسبت زاویه‌ی اصطکاک بین جداره‌ی شمع و خاک به زاویه‌ی اصطکاک خاک برابر ٠/٥٢ برآورد می‌گردد در حالی‌که توصیه‌ی بیش‌تر محققان بر٠/٦٧ زاویه‌ی اصطکاک خاک می‌باشد. در نهایت ضریب فشار جانبی خاک برابر ٠/٤٢ محاسبه گردید.

لازم به ذکر است که این اندازه‌گیری‌ها بر روی غلاف فلزی شمع قبل از عملیات بتن‌ریزی انجام شده است، به‌همین دلیل پیش‌بینی می‌شود بعد از خروج غلاف و انجام عملیات بتن‌ریزی، به‌دلیل فشار جانبی و نفوذ دوغاب بتن تازه به درون خاک، مقاومت جداره شمع بهبود پیدا کند.

فهرست علائم

چسبندگی خاک، kpa	C
ضریب انحنا	C_c
ضریب یکنواختی	C_u
قطر شمع، m	D
دانسیته‌ی نسبی	D_r
نسبت منافذ	e
توده‌ی ویژه‌ی خاک	G_s
ضریب حداکثر فشار جانبی خاک	K_{max}
ضریب حداقل فشار جانبی خاک	K_{min}
ضریب فشار جانبی خاک	$K_{(z)}$
طول شمع، m	L
عدد نفوذ استاندارد	N
فشار اتمسفریک، kpa	Pa
مقاومت جداره، kN	Q_s
مقاومت جداره در شمع کششی، kN	$(Q_s)_{tens}$
مقاومت جداره در شمع فشاری، kN	$(Q_s)_{comp}$
عمق، m	z
تنش جانبی مؤثر تثبیت شده بعد از احداث شمع، kpa	σ'_{rc}
تنش مؤثر شعاعی بعد از نصب، kpa	σ'_{rf}
تنش مؤثر شعاعی در لحظه‌ی گسیختگی، kpa	$\sigma'_{rf}(z)$
تنش مؤثر قائم، kpa	σ'_v
تنش مؤثر قائم، kpa	$\sigma'_{v(z)}$
تنش مؤثر قائم در نوک شمع، kpa	σ'_{vtip}
تنش مؤثر جانبی اضافی در اثر بارگذاری، kpa	$\Delta\sigma'_{rc}$

زاویه‌ی اصطکاک جداره‌ی شمع در لحظه گسیختگی	δ_f
مقاومت برشی نهایی در جداره‌ی شمع، kpa	τ_f
مقاومت نهایی جداره، kpa	$\tau_m(z)$
زاویه‌ی اصطکاک خاک در حالت بحرانی	ϕ_{cv}
زاویه‌ی اصطکاک خاک در اوج مقاومت برشی	ϕ_{peak}
ضریب پواسون شمع	ν_p
مدول الاستیسیته شمع، kpa	E_p
مدول برشی خاک، kpa	G_{avg}

مراجع

1. Lehane, B.M., Jardine, RJ., Bond, AJ., Frank, R., "Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests". *J Geotechnical Eng*., 119 (1):19-35, (1993).
2. Lehane, B.M., and Jardine, R.J., "Shaft capacity of driven piles in sand: a new design approach". *In proceedings of a Conference on the Behavior of Offshore Structures,* Boston, Mass., Vol. 1, pp. 23-36, (1994).
3. Kishida, H. and Uesugi, M. "Tests of interface between sand and steel in the simple shear apparatus", Géotechnique, 37(1): 46–52, (1987).
4. Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., Elson, W.K., Piling Engineering. Taylor & Francis Group, London and New York, (1992).
5. O'Neill, M.W., Hassan, K.M. Drilled Shafts: Effects of construction on performance and design criteria. Proc., *Int. Conf. Des*. Constr. Deep Founds. Orlando, FHWA, 1,137, (1994).
6. O'Neill, M.W. Drilled Shafts. Proc., *International Conf.* on Design and Construction of Deep Foundations, Fed. Highway Admin., Washington, D.C., Vol. 1, 185-206, (1994).
7. De Nicola, A. and M.F. Randolph, "Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand", *ASCE J*. Geot. Eng. Div., 119(12): 1952–1973, (1993).
8. Kraft, L. M., Lyons, C. G., "State of the art-ultimate axial capacity of grouted piles". Proceedings of the 6th Annual OTC, Houston Texas, pp.485-504, (1974).
9. Alawneh, A. S. "Tension., piles in sand: a method including degradation of shaft friction during driving", Transportation Research Record No. 1663. National Research Council. Washington, D. C. Paper No.990092; p.41-9, (1999).
10. Lehane, B.M., White, D. J., "Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand", *Canadian Geotechnical Journal 42 (4)*: 1039-1052 August, (2005).
11. Lehane, B.M., "Experimental investigations of pile behavior using instrumented field piles". Ph.D. thesis, University of London (Imperial College), London, U. K., (1992).
12. Lehanc, B.M., Schnider, J.A., and Xu, X. "Evaluation of design methods for displacement piles in sand", UWA Report, GEO: 05341.1, (2005).

13. Ramsey, N., Jardine, R.J., Lehane, B.M., and Ridly, A. "A review of soil-steel interface testing with the ring shear apparatus", *In proceedings of the 6th Conference on Offshore Site Investigation and Foundation Behavior*, Society for underwater technology, London, U.K., pp. 237-258, (1998).